

Guía práctica para observatorios vulcanológicos sobre el muestreo paleomagnético de depósitos piroclásticos de volcanes activos

 Geoffrey A. Lerner^{*α} and  R. Marcela Lira-Beltrán^β

^α División de Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), San Luis Potosí, Mexico.

^β Investigadora independiente.

RESUMEN

Esta guía está diseñada para mostrar brevemente al personal de observatorios vulcanológicos que monitorean volcanes con actividad de tipo explosiva como recolectar muestras de depósitos piroclásticos para realizar estudios paleomagnéticos. El paleomagnetismo es una herramienta que ha demostrado ser de gran utilidad para estudiar volcanes, tanto los que están en reposo como los actualmente activos. Los estudios de las características magnéticas y paleomagnéticas de rocas volcánicas pueden brindar información importante de los depósitos volcánicos y de los procesos que los originaron. Esta información puede incluir temperatura de emplazamiento, edad, y dirección de flujo. Para la aplicación de estas técnicas, se requiere la implementación de un tipo de muestreo específico. En esta guía se describen las razones para tomar muestras paleomagnéticas y cómo recolectarlas correctamente en campo sin necesidad de usar equipo especializado.



This article is available in English: <https://doi.org/10.30909/vol/hnbk5506> [PDF EN].

PALABRAS CLAVES: Volcano; Paleomagnetism; Pyroclastic density current;
Volcán; Paleomagnetismo; Corriente de densidad piroclástica.

1. INTRODUCCIÓN

El paleomagnetismo es una disciplina dentro de la geofísica que se enfoca en el estudio del campo magnético de la Tierra, de cómo ha cambiado sobre cientos, miles, o millones de años, y de cómo se graba dentro de materiales naturales [Tauxe et al. 2018]. Cuando se enfría un mineral magnético bajo una cierta temperatura (llamada la temperatura de Curie), se graba la información del campo magnético de la tierra actual. Las rocas volcánicas típicamente tienen composición mineralógica que incluye minerales magnéticos (p.ej., magnetita, titanomagnetita), por eso son uno de los medios principales para llevar a cabo los estudios paleomagnéticos. Los datos paleomagnéticos tienen muchas aplicaciones dentro los campos de la geología y la geofísica; se utilizan para estudiar un rango de temas que varían desde la geotectónica y el interior de la Tierra hasta ambientales.

Sin embargo, se pueden utilizar los datos paleomagnéticos de las rocas volcánicas para realizar investigaciones de los volcanes que las generan [Cañón-Tapia 1993; Ort et al. 2015; Lerner et al. 2022]. En un volcán activo con actividad explosiva, esto implica principalmente el estudio de depósitos de corrientes de densidad piroclásticas (CDP) y en ocasiones depósitos retrabajados (p. ej., lahares). Desde la década 1950 en Japón, se han desarrollado métodos para analizar datos paleomagnéticos para evaluar características de las CDP como temperatura de emplazamiento, dirección de flujo, y a veces edad de la erupción [Aramaki y Akimoto 1957]. Estos métodos se han desarrollado sobre el paso de los años y se han aplicado en estudios realizados en Italia, Estados Unidos, Grecia, Nueva Zelanda, Japón, y más lugares [Hoblitt y Kellogg 1979; Kent et al. 1981; Bardot y McClelland 2000; McClelland et al. 2004;

Tanaka et al. 2004]. En las últimas décadas, estos métodos comenzaron a ser utilizados más frecuentemente como una herramienta estándar para la evaluación de las características mencionadas de las CDP en muchos trabajos realizados alrededor del mundo (p.ej., Estados Unidos, Chile, México, Italia, Japón [Sulpizio et al. 2008; Paterson et al. 2010; Alva Valdivia et al. 2012; Pensa et al. 2018; Lerner et al. 2019b; Hasegawa et al. 2024]).

Una parte clave de los estudios paleomagnéticos aplicados a la volcanología es la desmagnetización térmica llevada en pasos. Durante este proceso, las muestras de material volcánica se calientan a temperaturas progresivamente más altas y se miden a cada paso utilizando equipo especializado del laboratorio [Tauxe et al. 2018]. Este protocolo resulta en los datos paleomagnéticos y de temperatura que son necesarios para la interpretación de depósitos y procesos volcánicos. Para que se puede llevar a cabo este trabajo, el primer paso importante es la recolección de núcleos o muestras de mano orientados en campo [Cañón-Tapia 2007].

Esta guía está diseñada para el uso de los trabajadores de observatorios volcánicos interesados en participar o colaborar en estudios paleomagnéticos. A continuación, se describen los motivos para realizar este tipo de estudio, los datos que se pueden obtener y los pasos prácticos para el muestreo paleomagnético.

2. ¿POR QUÉ ESTUDIAR LOS DEPÓSITOS DE LAS CDP CON EL PALEOMAGNETISMO?

El análisis de los datos paleomagnéticos pueden brindar información sobre algunas características muy importantes de los depósitos piroclásticos, y así, también nos permiten comprender las particularidades de los procesos de las CDP que

*  geoffrey.lerner@ipicyt.edu.mx

los depositaron (diríjanse a Ort et al. [2015] y Lerner et al. [2022] para consultar resúmenes y ejemplos de las técnicas que se describen a continuación). Estos son los principales (se resumen en la Tabla 1):

2.1. Tipo de proceso: ¿CDP o lahar?

En ocasiones, los procesos físicos asociados con las CDP y los lahares producen depósitos con características diferentes. Por ejemplo, los depósitos de CDP frecuentemente tienen clastos angulosos y se presentan de forma masiva (sin estructura interna aparente), mientras un depósito de lahar por la presencia de agua en su génesis puede presentar estratificación, clastos redondeados, y matriz arcillosa/endurecida [Pierson et al. 2025]. Pero en otras situaciones, con depósitos piroclásticos (p.ej., de tipo bloques y ceniza) removilizados rápidamente y sobre distancias no tan largas, la diferenciación entre un depósito volcánico primario o removilizado puede llegar a ser muy difícil solamente con la observación del depósito en el campo. Con la comparación de datos paleomagnéticos de varios clastos o matriz dentro un depósito de un flujo volcánico, es posible entender si un depósito se emplazó directamente de una CDP de temperatura alta durante una erupción o si se depositó en otro momento por procesos secundarios de baja temperatura (p.ej., en un lahar) [p.ej., Lerner et al. 2019a].

2.2. Temperatura: ¿A qué temperatura se emplazó el depósito de una CDP?

Las CDP tienen generalmente temperaturas de emplazamiento elevadas, entre 200 y 800 °C [Cole et al. 2015]. Aunque todas esas temperaturas son peligrosas para los seres humanos, ese rango: 1) implica el nivel de impacto en personas y edificios, 2) se puede usar para comprender los procesos que causaron la erupción. Con el estudio de los clastos o matriz de un depósito de CDP es posible entender con nivel relativamente alto de precisión la temperatura a la que se emplazó un depósito de CDP, y así conocer aproximadamente la temperatura del CDP durante la erupción [p.ej., Paterson et al. 2010; Uehara et al. 2015; Pensa et al. 2018].

2.3. Edad: ¿Cuándo se emplazó el depósito?

En ciertas situaciones, con datos de muy alta calidad y otras condiciones específicas, hay posibilidad de fechar depósitos volcánicos con información paleomagnética [Jurez_2026; p.ej., Lerner et al. 2019b; Hasegawa et al. 2023]. Esto se puede realizar al comparar la dirección paleomagnética grabada en algún material volcánico (p.ej., flujos de lava, proyectiles balísticos, o los clastos o matriz de un depósito de CDP) con la historia de cambio del campo magnético de la Tierra en una región (variación paleosecular). Esta técnica tiene un nivel de precisión variada y se depende fuertemente en la calidad y cantidad de datos disponibles. Además, se está limitada por los datos paleomagnéticos ya existentes dentro de una región geográfica (por lo general, los datos de variación paleosecular regionales se limitan al Holoceno). El α_{95} (incertidumbre, descrito por abajo) de la dirección paleomagnética promedia de un sitio típicamente supera 1–2° y la dirección geomagnética de la Tierra cambia por promedio aproximadamente 0.1 °Cada año; esto significa que la resolución de tiempo de

este método es décadas en mejor caso [Speranza et al. 2006]. Por estas razones, este método es más útil para estudiar erupciones prehistóricas y no tan continuas. En erupciones separadas solo por meses o años, es muy poco probable recibir resultados de fechas muy bien diferenciadas.

2.4. Dirección: ¿De dónde vino el depósito?

Con la técnica de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM), se puede estudiar la dirección de flujo de un depósito volcánico (como un flujo de lava o de una CDP) a través de la alineación de los minerales magnéticos que contienen [Ort et al. 2015]. Esta técnica se utiliza para conocer la dirección más probable de flujo de un depósito volcánico cuando estaba en movimiento. La ASM se puede emplear cuando se desconoce la fuente de una erupción prehistórica, a través de estudios de la dirección de flujos de varios puntos utilizando muestras de la matriz del depósito se puede ubicar dónde se encontraba el centro de emisión y mejor entender las condiciones de flujo de emplazamiento [p.ej., Ort et al. 1999; 2003].

3. ¿CÓMO FUNCIONA EL MÉTODO PARA ESTUDIAR LA TEMPERATURA DE EMPLAZAMIENTO DE DEPÓSITOS VOLCÁNICOS CON EL PALEOMAGNETISMO?

En el caso de un volcán con actividad frecuente, por lo general se conocen el momento y el origen de las erupciones, esta guía está enfocada en el método para determinar el tipo y la temperatura de emplazamiento de depósitos volcánicos. Este método se basa en la comparación de las direcciones paleomagnéticas grabadas en varios clastos dentro de un depósito piroclástico y tiene su origen en la técnica paleomagnética conocida como la “prueba del conglomerado” que se aplica generalmente a las rocas sedimentarias [Graham 1949]. Cuando una roca se enfría bajo cierta temperatura (temperatura de Curie), los minerales magnéticos de la roca registran una señal del campo magnético de la Tierra actual [Tauxe et al. 2018].

La temperatura de Curie depende en los minerales magnéticos que tiene la roca; la de magnetita (el mineral magnético más común en las rocas volcánicas) generalmente está alrededor de 580 °C, mientras otros minerales magnéticos menos comunes tienen temperaturas de Curie más altas (p.ej., hematita; 620 °C) o más bajas (p. ej., ilmenita; 200–400 °C). Las rocas pueden contener más de una fase de mineral magnético, por lo tanto, es común que más de una temperatura de Curie está representada en las características y comportamiento magnético de la roca.

La señal paleomagnética está grabada en la forma de un dato vectorial. Es decir, el dato tiene una dirección tridimensional (dirección paleomagnética) y un valor de fuerza (paleointensidad). La dirección paleomagnética suele reportarse con dos medidas, que representan la parte horizontal (una medida de la declinación de 0–360°) y vertical (una medida de inclinación de 0–90°) del vector. Cada medida paleomagnética también lleva un valor numérico llamado desviación angular máximo (DAM; representada en grados) que representa el nivel de incertidumbre asociado con los datos. La intensidad se reporta como un valor de fuerza del campo magnético, generalmen-

Tabla 1: Resumen de métodos paleomagnéticos para estudiar depósitos volcánicos.

Método	¿Para qué se usa?	¿Qué tipos de muestras se necesitan?	¿Qué equipo es necesario?	¿Qué más ocupas?
Diferenciación entre depósitos primarios y re-movilizados	Para conocer si un depósito piroclástico se depositó a temperatura elevada durante una erupción o por procesos secundarios de baja temperatura	Muestras de mano (clastos) orientados o muestras cúbicas orientados (matriz)	Brújula geológica, cepillo (brocha), marcador permanente, martillo/espátula	Colaboración con un laboratorio paleomagnético (con magnetómetro y hornos), equipo para cortar o perforar rocas
Temperatura de emplazamiento del depósito	Para saber a qué temperatura se emplazó un depósito piroclástico	Muestras de mano (clastos) orientados o muestras cúbicas orientados (matriz)	Brújula geológica, cepillo (brocha), marcador permanente, martillo/espátula	Colaboración con un laboratorio paleomagnético (con magnetómetro y hornos), equipo para cortar o perforar rocas
Fecha paleomagnético	Para entender cuando pasó la erupción de que proviene un depósito volcánico	Muestras de mano o núcleos perforados de depósitos volcánicos	Brújula geológica, cepillo (brocha), marcador permanente, martillo, taladro especializado y accesorios	Colaboración con un laboratorio paleomagnético (con magnetómetro y hornos), resultados muy precisos de bajo error, curva de variación paleosecular regional
Dirección de flujo (anisotropía de susceptibilidad magnética; ASM)	Para localizar la fuente desconocida de depósitos volcánicos	Muestras orientadas de matriz de depósitos volcánicos	Cajas especializadas de muestreo paleomagnético de sedimentos, brújula geológica, marcador permanente	Colaboración con un laboratorio paleomagnético (con equipo especializado para medir ASM)

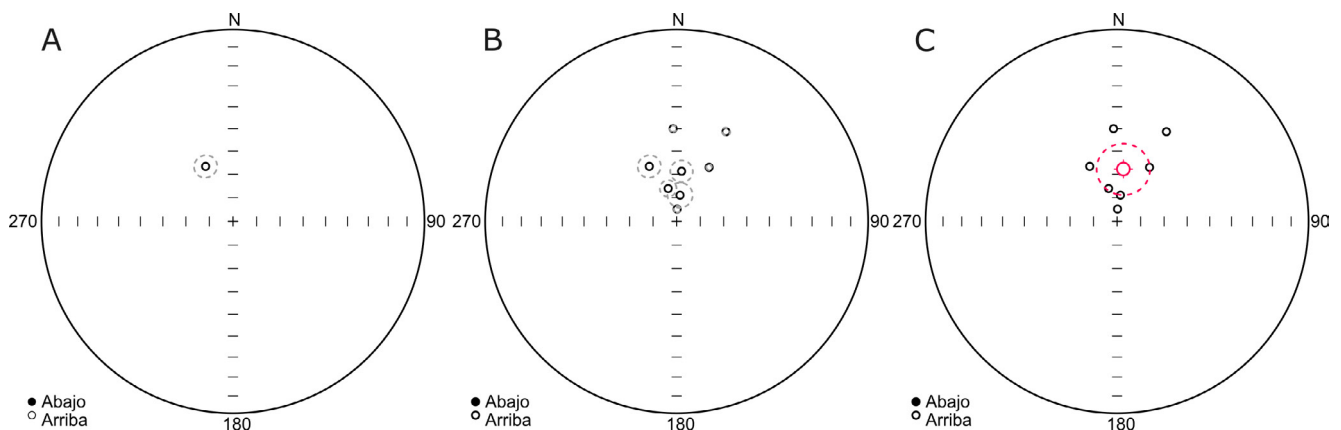


Figura 1: Redes estereográficas que representan los datos paleomagnéticos: [A] red estereográfica que muestra un resultado paleomagnético de un clasto del depósito volcánico, junto con su círculo de DAM, [B] red estereográfica que muestra resultados de varios clastos en un sitio, cada uno con su propio círculo de DAM, [C] red estereográfica con los puntos que representan varios resultados paleomagnéticos de un sitio, con un punto más grande y un círculo que representa el promedio de todos los clastos y el α_{95} del promedio.

te en microTesla (μT). Por lo tanto, una medida completa de dirección paleomagnética y de paleointensidad se ve así:

$$XXX^\circ, YY^\circ, MAD = x^\circ, Z \mu\text{T}, \quad (1)$$

dónde XXX representa la declinación, YY representa la inclinación, x representa la desviación angular máximo, y Z representa la intensidad (p.ej., $034^\circ, 27^\circ, DAM = 2.1^\circ, 43 \mu\text{T}$).

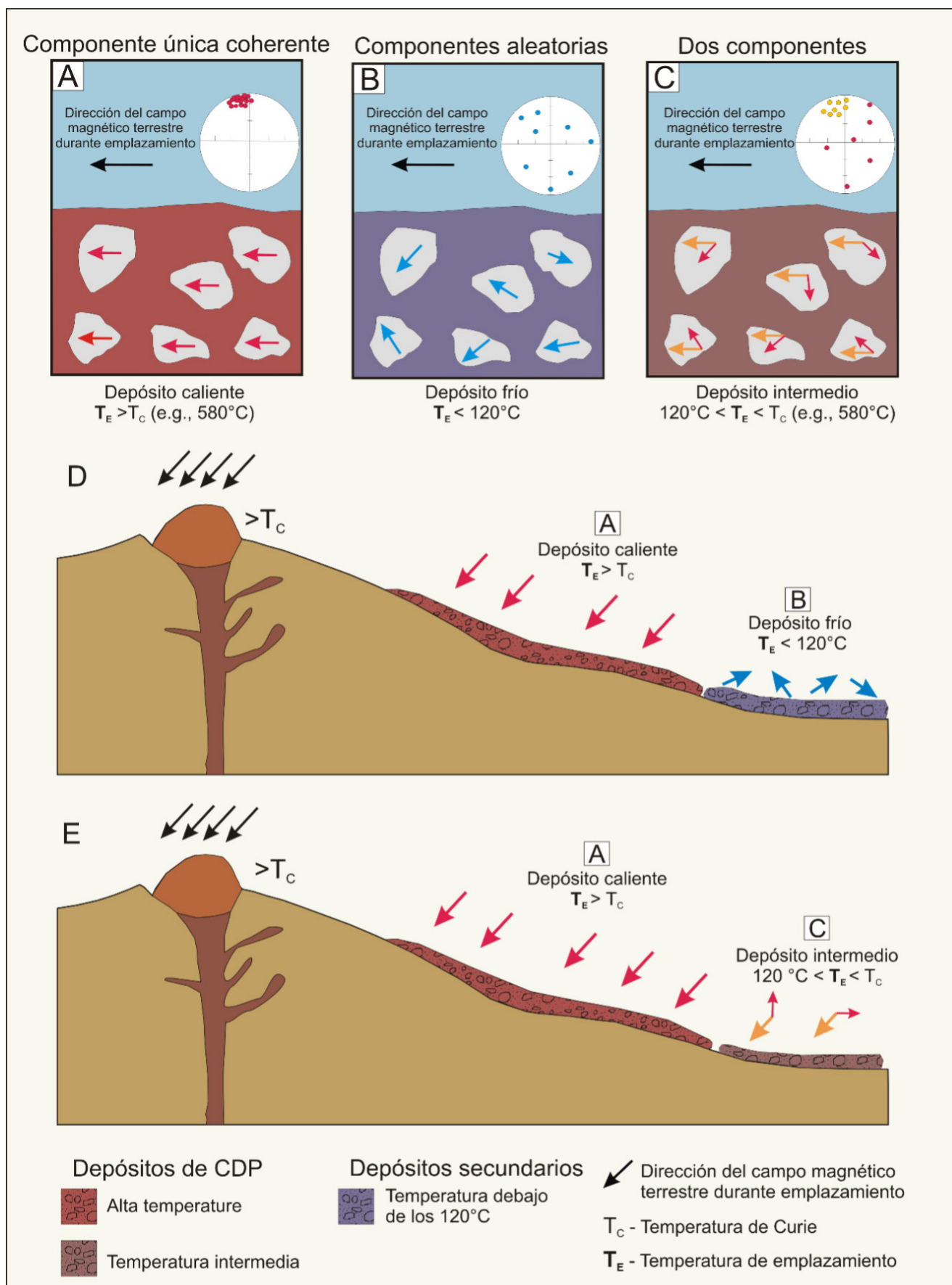


Figura 2: (Leyenda en la página siguiente.)

Figura 2: (Página anterior.) Representación de las condiciones deposicionales y resultados paleomagnéticos asociados con depósitos piroclásticos con historias de enfriamiento diferentes. Flechas de color representan los resultados direccionales obtenidos de clastos y depósitos al momento del muestreo. [A] Depósito de CDP emplazado por arriba de la temperatura de Curie (p.ej., ~580 °C); resultados de direcciones paleomagnéticas similares de clastos dentro de cada sitio, [B] depósito removilizado (p.ej., lahar) emplazado a temperatura ambiente (<120 °C); resultados paleomagnéticos aleatorios de clastos dentro de cada sitio, [C] depósito de CDP emplazado a temperatura intermedia (entre la temperatura de Curie y 120 °C); los clastos dentro del depósito tienen historias de enfriamiento complejas, con al menos dos componentes de señal magnética, temperatura alta antes del emplazamiento (resultados aleatorios) y temperatura baja después del emplazamiento (direcciones paleomagnéticas alineadas). [D] y [E] demuestran cómo estas condiciones aplican a depósitos volcánicos en campo. Modificado de Lerner et al. [2022] y Uehara et al. [2015].

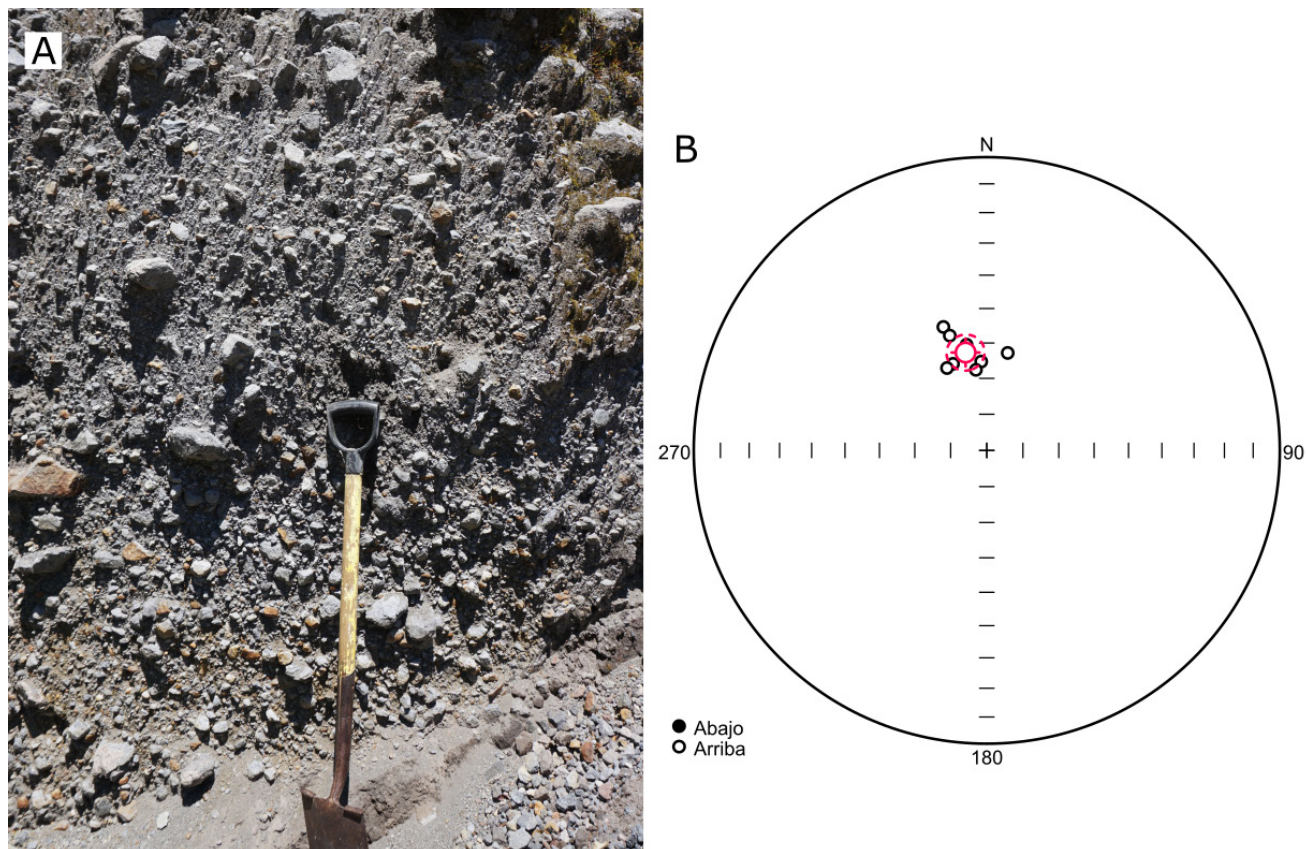


Figura 3: [A] ejemplo de un depósito de CDP emplazado por arriba de la temperatura de Curie (p.ej., ~580 °C), [B] resultados visualizados en una red estereográfica de clastos muestreado de un depósito que fue emplazado arriba de la temperatura de Curie, con direcciones paleomagnéticas alineadas.

La componente direccional de los datos se puede representar en una red estereográfica, que muestra la proyección de la dirección (y su DAM) sobre un hemisferio (Figura 1A). Múltiples resultados paleomagnéticos se pueden presentar en la misma red estereográfica para comparar los resultados de varias muestras paleomagnéticas (Figura 1B), y si las muestras están relacionadas podemos calcular una dirección promedio (con su propia incertidumbre, llamado α_{95}) de los datos vectoriales de todas las muestras (Figura 1C). Por lo general, un grupo compuesto de 6–8 clastos basta para medir la dirección promedio de un sitio de un depósito de CDP, pero esto puede variar depende de las metas del estudio y del material disponible (véanse a la Sección 5 Métodos de muestreo).

Para este método, se utiliza la dirección paleomagnética en combinación con las características importantes de los procesos volcánicos para evaluar la temperatura de un flujo volcánico en su momento de deposición. Hay tres escenarios posibles que se pueden encontrar cuando aplicamos este método en el estudio de un depósito (Figura 2):

1. **Depósito emplazado por arriba de la temperatura de Curie (p.ej., ~580 °C en el caso de magnetita):** Este caso corresponde a un depósito de CDP emplazado por procesos volcánicos (Figura 2A, 3A). Esto significa que, durante la erupción, la mayoría del material que conforma el depósito descendió del volcán a temperatura alta, en ocasiones incorporando material adicional que también fue calentado por la CDP. Todo el material (clastos y matriz) del depósito se emplazó en

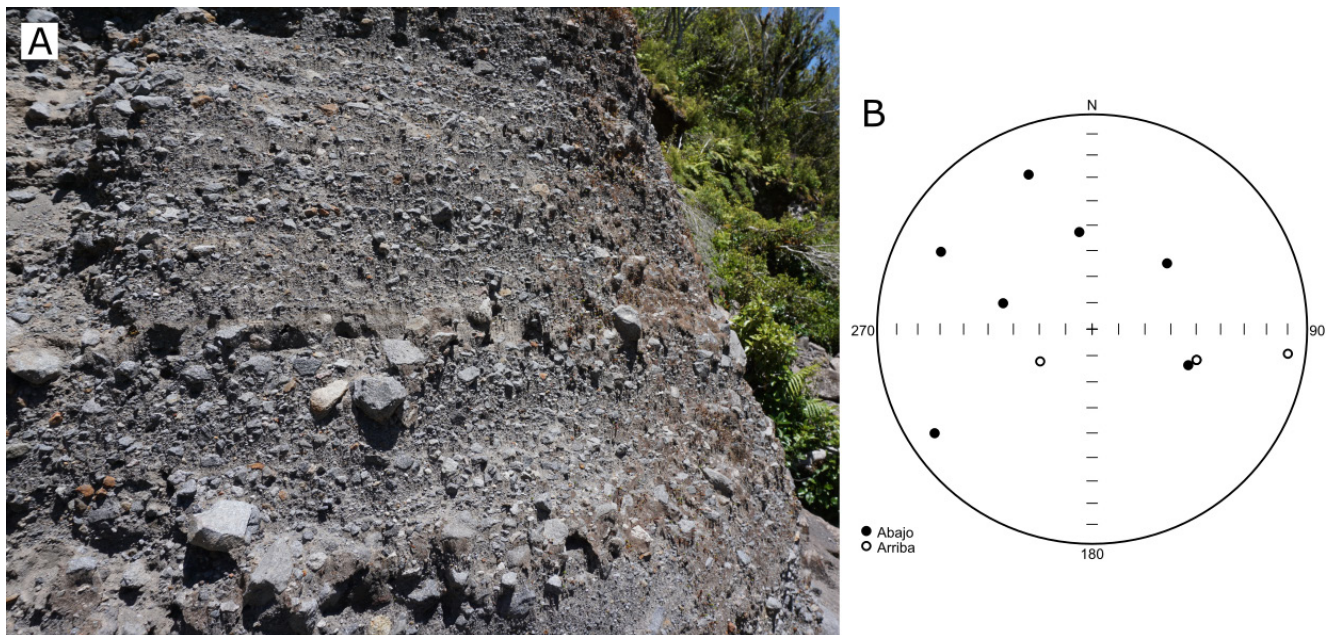


Figura 4: [A] ejemplo de un depósito removilizado emplazado cerca de la temperatura ambiente ($<120\text{ }^{\circ}\text{C}$), [B] resultados visualizados en una red estereográfica estereonet de clastos muestreado de un depósito emplazado a temperatura ambiente, con direcciones paleomagnéticas aleatorias.

conjunto a una temperatura elevada y se enfrió bajo un mismo campo magnético (i.e., todo el material del depósito comparte la misma historia de enfriamiento). Cualquier material que fue incorporado dentro del flujo fue calentado hasta que se equilibró con la temperatura del resto del depósito que se estaba enfriando (conocida como temperatura de equilibrio). Desde el punto de vista paleomagnético, significa que cuando muestreemos varios clastos de un depósito y realizamos mediciones paleomagnéticas, debemos recibir resultados similares (i.e., direcciones paleomagnéticas similares) en todos los clastos (Figura 2A). Esta información se puede representar en una red estereográfica, donde podemos visualizar una agrupación estadísticamente significativa de los resultados de clastos muestreados de un sitio individual independiente dentro del depósito (Figura 3B).

2. Depósito emplazado a (o cerca de la) temperatura ambiente (aprox. $<120\text{ }^{\circ}\text{C}$): Este caso corresponde a un depósito emplazado a temperatura baja después de haberse enfriado en otro lugar para posteriormente ser removilizado y depositado en otro sitio (Figura 2B, Figura 4A). Esto significa que entre su periodo de enfriamiento (y con eso la adquisición de la dirección paleomagnética asociada con el campo magnético de la Tierra de ese momento) y el presente, todo el material correspondiente al depósito fue físicamente removilizado y transportado a otro sitio donde se depositó nuevamente. Esto implica que, aunque si parcialmente o todo el depósito en el momento de su deposición original compartió la misma historia de enfriamiento y dirección paleomagnética, el retrabajo físico del material ha distribuido de forma aleatoria la orientación de los clastos. Cuando las direcciones paleomagnéticas de todos los clastos muestreados sean medidas, no tendrán una agrupación significativa de los resultados (Figura 2B). En

su presentación en el estereonet, se verá una presentación estadísticamente aleatoria de los datos (Figura 4B).

3. Depósito emplazado a temperatura intermedia (arriba de la temperatura ambiente, pero por debajo de la temperatura de Curie): Las CDP se pueden emplazar a temperaturas intermedias (p.ej., $350\text{ }^{\circ}\text{C}$). En este caso, el depósito está conformado por material que posiblemente se enfrió parcialmente en otro lugar antes de su emplazamiento final o resultó de una CDP de temperatura más baja (Figura 5A). Las muestras de un depósito con estas características presentan un resultado más complejo porque los clastos contienen una señal que representa (al menos) dos partes de su historia de enfriamiento: antes y después del emplazamiento final (Figura 2C). Esto se puede visualizar en un gráfico paleomagnético conocido como diagrama de componentes vectoriales, que divide la dirección del vector en su componente horizontal y vertical y nos permite evaluar que tan compleja ha sido la historia de enfriamiento de cada clasto (Figura 5B). Esto significa que cuando se hacen comparaciones de las direcciones paleomagnéticas de los clastos, se usan múltiples redes estereográficas: uno que representa la componente de alta temperatura de su señal magnética (adquirida antes del emplazamiento final) y uno que representa la componente de alta temperatura de su señal magnética (adquirida durante su enfriamiento en el lugar de emplazamiento final) (Figura 5C, 5D). En la parte de temperatura alta, cada clasto puede tener una historia de enfriamiento diferente pero también ha experimentado un desplazamiento antes de su emplazamiento final, por lo tanto, en las redes estereográficas se presenta un resultado estadísticamente aleatorio (Figura 5C). Sin embargo, después del emplazamiento final del depósito, todos los clastos se enfriaron juntos. Por esta razón, la red estereográfica que representa la parte de enfriamiento

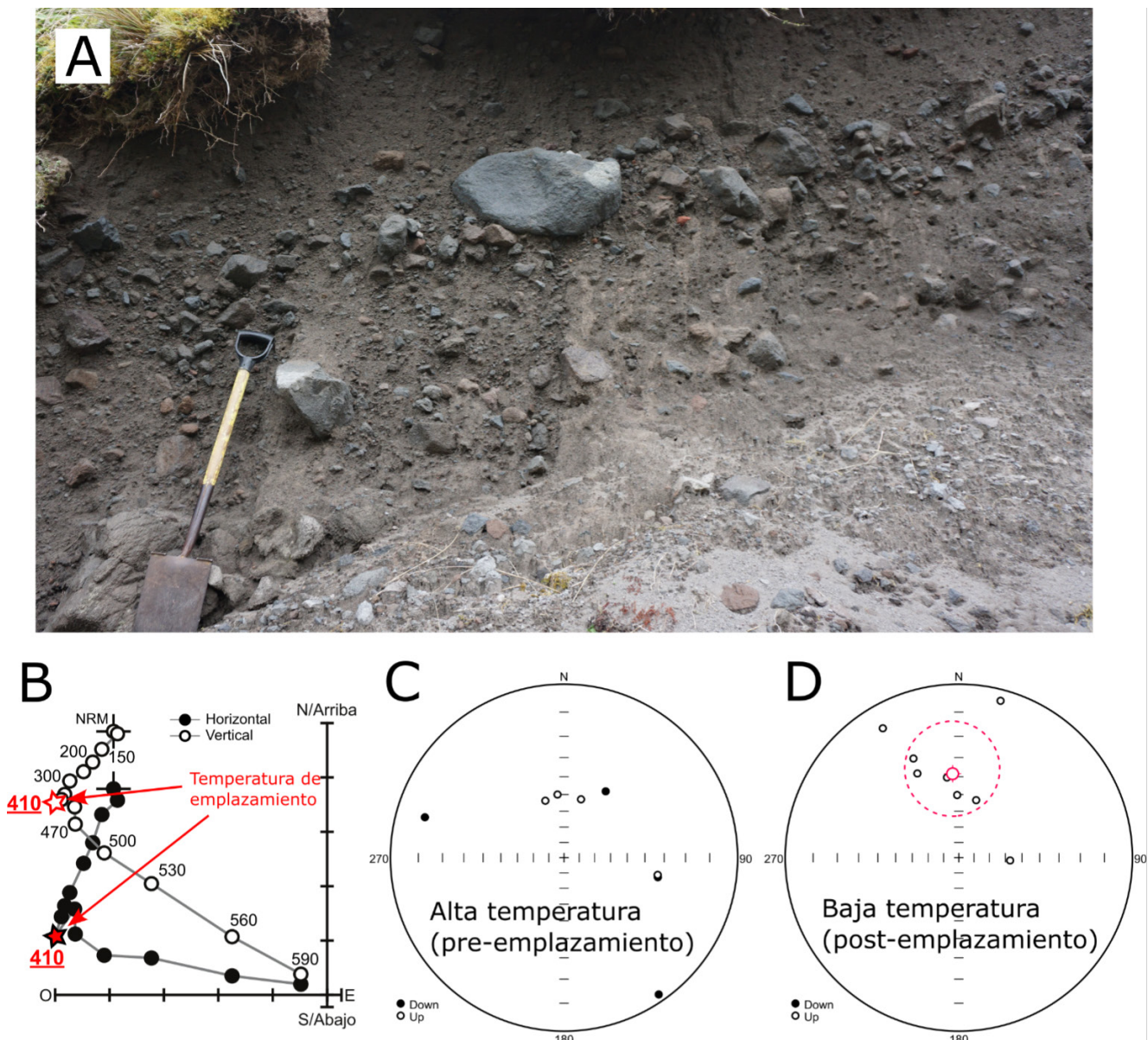


Figura 5: [A] ejemplo de un depósito de CDP emplazado a temperatura intermedia ($\sim 120\text{--}580\text{ }^{\circ}\text{C}$), [B] diagrama de componentes vectoriales de un clasto emplazado a temperatura intermedia. Los números representan las temperaturas (en $^{\circ}\text{C}$) que corresponden al proceso de enfriamiento durante y después de emplazamiento y a los pasos de temperatura de desmagnetización en el laboratorio. En el diagrama se pueden visualizar claramente dos componentes de la magnetización remanente. En el punto en donde se unen las dos componentes representa la temperatura de emplazamiento, [C, D] resultados en dos redes estereográficas de clastos muestreados de un depósito emplazado a temperatura intermedia. En este caso, los resultados que representan cada parte de la historia de enfriamiento son reportados en redes estereográficas separadas, una [C] que representa la historia de enfriamiento de alta temperatura, antes del emplazamiento (direcciones paleomagnéticas aleatorias) y otra [D] que representa la historia del enfriamiento de baja temperatura, después del emplazamiento (direcciones paleomagnéticas alineadas).

de temperatura baja puede presentar direcciones bien agrupadas (Figura 5D). El punto que representa el cambio entre el componente de alta y baja temperatura de la señal magnética es identificable claramente en el diagrama de componentes vectoriales (Figura 5B), y representa la temperatura de emplazamiento estimada de cada clasto dentro del depósito. Con las estimaciones de la temperatura de varios clastos dentro de un depósito de temperatura intermedia, se puede estimar una

temperatura general de emplazamiento del flujo que originó el depósito.

4. ¿QUÉ TIPO DE RESULTADO ESPERAMOS AL UTILIZAR ESTE MÉTODO?

Los resultados de la aplicación del método dependen del tipo de depósito muestreado, pero generalmente pueden agruparse en dos categorías:

1. Diferenciación entre los tres tipos principales de depósito. De cada sitio muestreado podemos obtener una red estereográfica que muestra la dirección paleomagnética de los clastos. La aplicación fundamental es conocer si el depósito se emplazó a temperatura alta, intermedia, o baja.

2. Resultados de temperatura para cada clasto muestreado en un depósito de temperatura alta o intermedia. Cada clasto se puede evaluar usando un diagrama de componentes vectoriales para estimar una temperatura de emplazamiento precisa en el caso de depósitos de temperatura intermedia o una temperatura de emplazamiento mínimo en el caso de depósitos de alta temperatura. Las estimaciones de la temperatura de todos los clastos dentro de un depósito se pueden evaluar para conocer la temperatura de emplazamiento general del depósito.

Estos resultados en combinación con el trabajo y análisis volcanológico de los depósitos en campo, se puede utilizar para la interpretación del origen de los depósitos estudiados y la dinámica de los flujos que los emplazaron.

5. MÉTODOS DE MUESTREO

5.1. Tipos de muestras

El tipo de muestra generalmente recolectada para el empleo de este método son muestras de mano orientadas. En la mayoría de las aplicaciones del método, se recomienda seleccionar clastos líticos (i.e., fragmentos de roca derivados de un domo de lava o el edificio volcánico e incorporado en la CDP). Sin embargo, otros materiales como fragmentos de pómez, matriz de ceniza y materiales arqueológicos pueden también ser utilizados dependiendo del tipo de investigación [p.ej., Cioni et al. 2004; McClelland et al. 2004; Bowles et al. 2018; Lerner et al. 2019a]. Estas muestras se usan para crear especímenes que se pueden desmagnetizar y medir con el equipo de laboratorio. Estos especímenes generalmente tienen forma de cilindros de 25 mm diámetro y 25 mm de espesor (Figura 6A), o cubos de $2 \times 2 \times 2$ cm (Figura 6B–6C). Los datos obtenidos por las medidas paleomagnéticas son vectores que representan direcciones tridimensionales del campo magnético de la Tierra que han sido grabado en las rocas muestreadas. Por eso, es fundamental que se comprenda la orientación física que tenían las muestras cuando eran parte del afloramiento muestreado. Por lo tanto, tenemos que tomar en cuenta las siguientes características clave que deben de tener las muestras de mano recolectadas en campo:

1. El clasto debe de ser bastante grande para poder perforar o cortar al menos un espécimen (de preferencia dos o más) de cilindro o cubo. Generalmente un clasto del tamaño de un puño (diámetro alrededor de 5–10 cm) es ideal (Figura 6D),

2. El clasto sin excepción debe de ser recolectado in situ dentro del afloramiento del depósito estudiado (i.e., exactamente en su ubicación original de deposición; no debe ser recolectado en sitios donde el depósito se ve removido o directamente del suelo, aunque sea parte del mismo afloramiento) (Figura 6D),

3. El clasto seleccionado debe de tener una superficie plana que pueda ser utilizada para orientar y etiquetar (Figura 6D),

4. El clasto debe de estar orientado con una brújula geológica y etiquetado en campo *antes de retirarlo del afloramiento* (Figura 6E).

5.2. Equipo

El equipo necesario para llevar a cabo el muestreo de depósitos piroclásticos es relativamente sencillo de utilizar y se puede ser llevado fácilmente por una persona. El principal trabajo que se hace en campo es identificar clastos para muestrear, orientar y etiquetar, recolectar las muestras del afloramiento, y posteriormente limpiar y etiquetar nuevamente cada clasto. Para lograr esto, se recomienda utilizar el siguiente equipo:

- Libreta de campo (Figura 7A)—Se utiliza para registrar las orientaciones de las muestras paleomagnéticas, coordenadas y nombre de los sitios, así como observaciones geológicas.

- Cepillos (brochas) (Figura 7B)—Estos se utilizan para limpiar la muestra antes de etiquetarlas; es importante que la muestra se encuentre relativamente limpia para que la flecha de orientación y etiquetas no se borren.

- Marcadores permanentes (Figura 7C)—Se emplean para colocar la orientación y nombre o número de las muestras; es importante que el marcador sea permanente para que la etiqueta no se borre o difumine, incluso en el caso que las muestras estén mojadas o sucias. Se recomienda llevar varios marcadores a campo ya que suelen desgastarse rápido, especialmente si la superficie de la roca está cubierta con ceniza.

- Brújula geológica (Figura 7D)—Se usa para orientar los clastos antes de extraerlos del afloramiento; una brújula con clinómetro y nivel con la capacidad de tomar una medida horizontal (azimut) y vertical (echado).

- Aplicación móvil de brújula-clinómetro (Figura 7E)—Muchos smartphones modernos tienen hardware interno suficiente para tomar mediciones precisas utilizando una de las varias aplicaciones disponibles. Antes de usar un smartphone para las mediciones de orientación, es recomendable comparar la aplicación a utilizarse con la brújula geológica para asegurarse que las mediciones sean precisas.

- Espátulas metálicas (Figura 7F)—Son útiles para limpiar muestras y remover el exceso de matriz, para poder llevar a cabo la lectura de la orientación una forma más sencilla.

- Martillo/pica (Figura 7G)—Se utiliza para limpiar el área alrededor de las muestras, también para extraer las muestras del afloramiento, y en ocasiones puede ser útil para romper una muestra grande.

- Bolsas de muestreo (Figura 7H)—Bolsas de plástico de tamaño grande (fabricadas preferentemente de plástico grueso para evitar que se rompan) o bolsas de tela (p.ej., bolsas reutilizables de manta) son útiles para organizar los grupos de clastos tomado de sitios individuales.



Figura 6: Fotografías de las características más importantes de muestras y especímenes paleomagnéticos. [A] ejemplo de especímenes cilíndricos de roca de diámetro de 25 mm y espesor de 25 mm, [B] ejemplo de especímenes cubicos de roca de $2 \times 2 \times 2$ cm, [C] cubos de plástico y metal especializados para toma de muestras cubicas de matriz de ceniza de $2 \times 2 \times 2$ cm, [D] afloramiento de un depósito de CDP donde se pueden apreciar clastos factibles para el muestreo, [E] ejemplo de una muestra de mano ideal, nótese la superficie plana de la roca que es ideal para medir y etiquetar.

5.3. Selección de sitios

El proceso de selección de sitios para llevar a cabo el muestreo depende en el tipo de erupción y depósito, pero en general se tiene el mismo objetivo que es recolectar muestras orientadas en una serie de sitios independientes. La palabra *independiente* en este caso significa que cada sitio seleccionado es geológicamente y geográficamente independiente y por esa razón no está influenciado por la historia de enfriamiento de los otros sitios. Además, significa que cada muestra está orientada independientemente, y así no es dependiente en la orientación de las otras muestras. Eso significa que cuando un espécimen de cada muestra es medida en el laboratorio cada dirección paleomagnética obtenida se puede utilizar para evaluar un sitio, y todos los sitios se puede comparar para evaluar el depósito en su conjunto.

Cuando es posible, es útil seleccionar sitios que puedan representar historias de enfriamiento diferentes de una misma erupción. Lo anterior puede implicar la recolección de muestras a diferentes distancias del volcán dentro la misma barranca o dentro de varias barrancas alrededor del volcán (si

el depósito piroclástico no está confinado a un solo canal), y se puede llevar a cabo el muestreo en diferentes secciones del depósito (base, sección media y parte superior del depósito) si el depósito tiene un espesor adecuado. También se puede realizar el muestreo de varios pulsos originados en la misma erupción (si los eventos o depósitos implican emplazamiento en pulsos) para estudiar la historia de emplazamiento de la misma erupción.

Cuando el objetivo del estudio es diferenciar entre depósitos primarios y secundarios, los sitios se deben seleccionar donde exista esta incertidumbre. Cuando el objetivo es estimar la temperatura de emplazamiento de los depósitos de CDP ya identificados, los sitios se deben seleccionar con base en la certidumbre de que se trata de depósitos primarios y no removilizados.

5.4. Muestreo en el afloramiento

Después de llegar al afloramiento seleccionado con el equipo necesario para llevar a cabo el muestreo, el protocolo a seguir es relativamente sencillo:



Figura 7: Equipo esencial para el muestreo paleomagnético de depósitos piroclásticos: [A] Libreta de campo, [B] cepillos o brochas de tamaños variados para limpiar las muestras de roca antes de etiquetarlas, [C] marcadores permanentes para etiquetar, [D] ejemplo de una brújula geológica con clinómetro para orientar muestras, [E] ejemplo de un aplicación móvil de brújula-clinómetro que también se puede utilizar para orientar muestras, [F] espátulas metálicas de tamaños variados para limpiar el afloramiento y las muestras, [G] martillo/pica geológica para limpiar el área alrededor de la muestra y extraer la muestra del afloramiento, [H] bolsas de tela o plástico para organizar las muestras orientadas.

1. Preparación de las notas—La manera más sencilla de organizar la información de las muestras paleomagnéticas es una tabla de tres columnas con los encabezados para el nombre de la muestra y sus mediciones de orientación (Figura 8A). Es útil incluir cualquier información relevante sobre el muestreo, incluido el nombre de la persona que toma las muestras, la convención de orientación utilizada (p.ej., rumbo y echado, azimut y cabeceo, etc.), si la corrección de declinación local ya está aplicada o si se tiene que tomar en cuenta posteriormente (depende de la ubicación y herramienta de orientación utilizada). También es ideal incluir información complementaria sobre la geología y geografía de cada sitio, incluido las coordenadas, observaciones del afloramiento, número de capas, color, selección, forma y tamaño de los componentes, etc. Se recomienda tomar fotografías del afloramiento para documentar los detalles del depósito. Los nombres de sitios paleomagnéticos generalmente consisten en un prefijo relacionado al proyecto (de preferencia corto ya que es mejor para etiquetar) y un número de sitio en el orden de recolección. Por ejemplo, F1, F2, F3 o

FG1, FG2, FG3 (Fuego sitio 1, Fuego sitio 2, Fuego sitio 3), o F25-1, F25-2, F25-3 (Fuego 2025 sitio 1, etc.).

2. Identificación de clastos para el muestreo—Los clastos ideales son alrededor del tamaño de un puño y, deben de tener una superficie relativamente uniforme y plana que se pueda orientar sin dificultad (Figura 8B). Para orientar de manera más sencilla, se recomienda buscar clastos cuya superficie plana se incline hacia adelante del afloramiento (i.e., no debe de estar invertida) (Figura 8C). Seleccionar aproximadamente entre 6–8 clastos adecuados para muestreo. Generalmente esto resulta en una cantidad de datos suficiente para llevar a cabo el análisis paleomagnético. En el caso de cuando se sabe que se llevará acabo el muestreo en pocos sitios (p.ej., los depósitos de la erupción de interés ya están muy erosionado o no están accesibles de forma segura), puede ser de gran utilidad tomar más muestras. En casos donde se pueden identificar muy pocas muestras adecuadas para muestreo en un afloramiento (p.ej., pocos clastos, clastos sin superficies planas, límites de

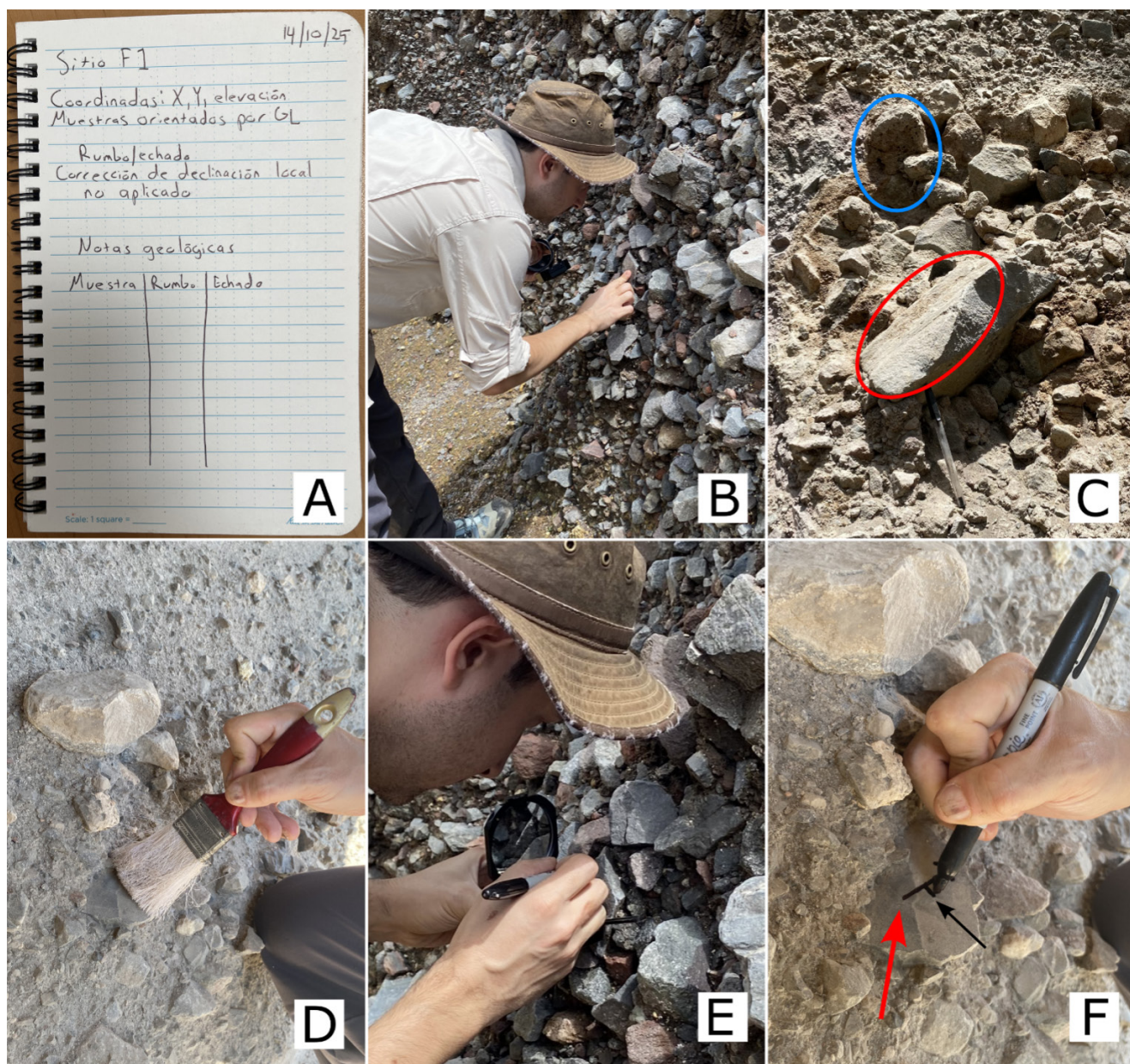


Figura 8: Pasos para recolectar muestras paleomagnéticas orientadas de un depósito piroclástico. [A] Ejemplo de la información que se debe tomar en la libreta de campo para registrar el muestreo y orientación, [B] identificación de clastos ideales para muestreo en el afloramiento, [C] ejemplo de un afloramiento con un clasto cuya superficie plana se inclina hacia adelante del afloramiento (círculo rojo) y un clasto con una superficie invertida (círculo azul), [D] limpieza del área alrededor de la muestra y de la superficie de una muestra antes de orientar y etiquetar, [E] uso del marcador permanente para dibujar una flecha de rumbo paralelo a la medición tomada con la brújula, [F] clasto con la flecha de rumbo marcada (indicado por la flecha roja) y línea pequeña perpendicular a la flecha de rumbo en la dirección del echado de la superficie plana de la muestra (indicado por la flecha pequeña negra). (Continúa en la página siguiente)

tiempo en el muestreo o seguridad), todavía es factible muestrear si se puede identificar un mínimo 4–5 clastos adecuados.

3. Limpiar los clastos y crear el espacio para llevar a cabo la orientación (Figura 8D)—Limpiar la superficie del clasto que se va a orientar (con el uso de cepillo y espátula) para que la flecha correspondiente a la orientación se puede trazar bien. Si es necesario, remover el material excesivo de alrededor del

clasto (sin mover o desplazar el clasto) para crear bastante espacio para usar la brújula o smartphone para orientar.

4. Orientar y etiquetar la muestra—Si se utiliza la brújula, nivelar la brújula para tomar una medición de rumbo de la superficie plana expuesta de la muestra (generalmente rumbo se mide a la derecha). Sin mover la brújula, usar el marcador para dibujar una flecha paralela al rumbo en la superficie de la roca (usar el borde de la brújula como una guía) (Figu-



Figura 8: (Continuación de la página anterior) [G] medición de la declinación de la muestra con la brújula geológica, [H] medición de la declinación e inclinación de la superficie plana de la muestra con una aplicación móvil de brújula-clinómetro, [I] ejemplo de una libreta de campo con la tabla estándar con nombres de muestras y orientaciones, [J] etiqueta de una muestra orientada con su nombre o número de muestra después de extraerla del afloramiento, [K] muestras de un sitio individual organizadas en una bolsa de plástico bien etiquetadas.

ra 8E). Dibujar una línea pequeña en el centro de la flecha en la dirección del echado de la superficie orientada (Figura 8F). Utilizar el clinómetro de la brújula para medir el echado de la superficie orientada (Figura 8G).

4a. Si se utiliza una aplicación móvil, es necesario que se utilice una regla de nivel o una brújula geológica para dibujar la línea de rumbo (con la flecha a la derecha) en la muestra (Figura 8E). Dibujar una línea pequeña en el centro de la flecha en la dirección del echado de la superficie orientada (Figura 8F). Colocar el smartphone con la aplicación abierta sobre la muestra, de manera que el plano del teléfono quede paralelo a la superficie plana de la roca (Figura 8H). La aplicación

presentará las mediciones horizontal y vertical (p. ej., rumbo y echado) en mismo momento.

5. Registrar las orientaciones de las muestras—Cada orientación se debe registrar en la tabla de la libreta de campo, con las muestras etiquetadas por letra en orden alfabética (p.ej., F1A, F1B, F1C, para Fuego sitio 1 muestra A, Fuego sitio 1 muestra B, etc.) (Figura 8I).

6. Recolectar las muestras del afloramiento y etiquetarlas—Utiliza las espátulas, pica, etc. para extraer cada muestra orientada del afloramiento, y etiquetarlas con la letra que corresponde a las mediciones registradas en la libreta (Figura 8J).

Protocolo de muestreo paleomagnético

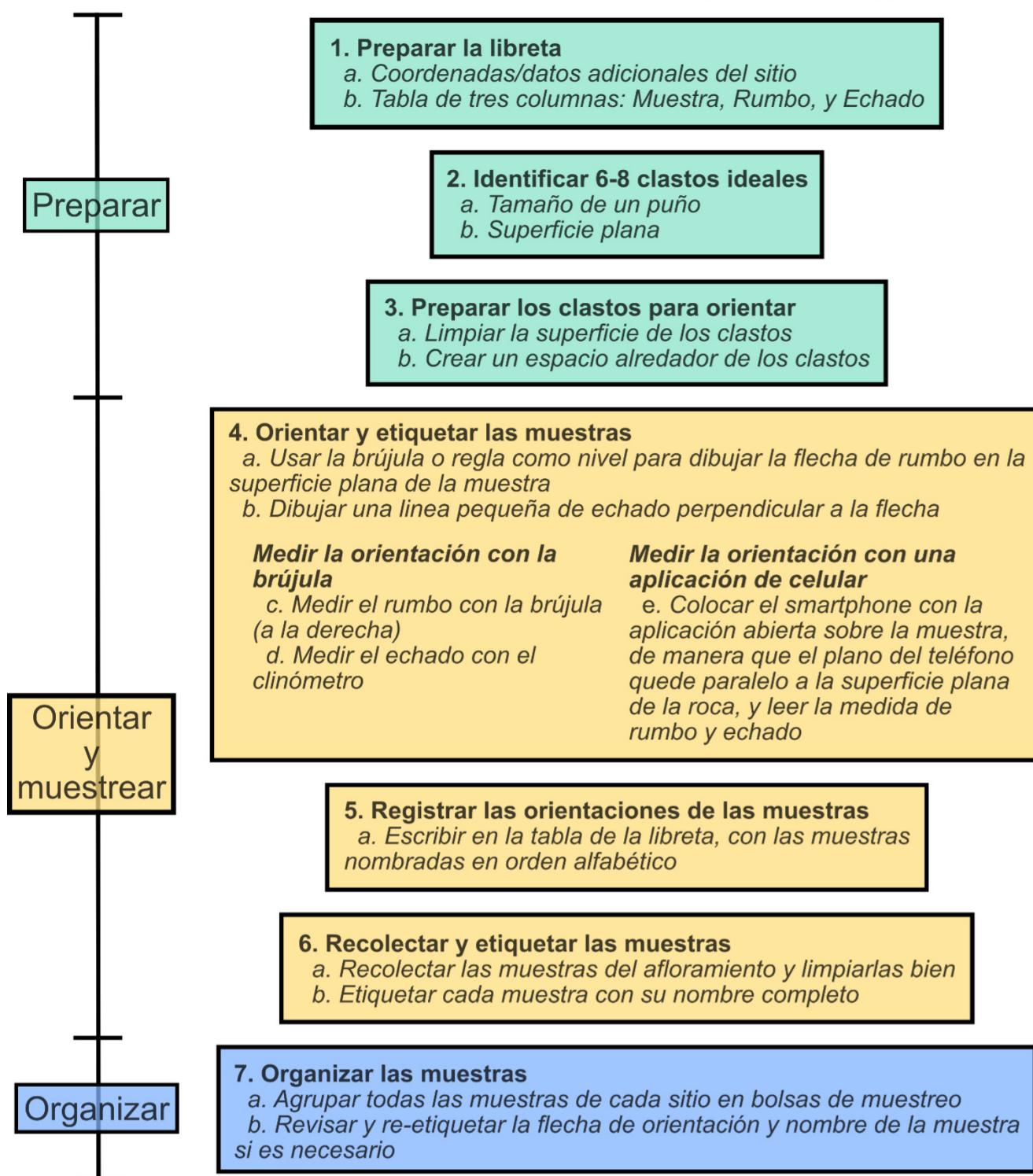


Figura 9: Guía breve y visual del protocolo de muestreo paleomagnético. Los siete pasos están relacionados con las descripciones más detalladas en el texto, y las fotos relevantes que corresponden a cada paso se pueden observar en la Figura 8.

Emplear los cepillos, etc. para limpiar las muestras si es necesario para asegurar que la etiqueta se encuentre de manera claramente escrita.

7. Organizar las muestras y asegurar la calidad de las etiquetas—Se recomienda guardar todas las muestras de un sitio individual en bolsas de plástico o tela claramente etiquetadas (Figura 8K). Antes de guardar las muestras, se debe de asegurar que se encuentran limpiadas y etiquetadas o re-

etiquetadas en varios puntos, para asegurar que la etiqueta y flecha de orientación no se difuminen ni borren durante transporte y almacenamiento. Ocasionalmente, los clastos resultarán ser más grandes de lo esperado una vez retirados del afloramiento. Si es posible, estos clastos se pueden romper hasta alcanzar un tamaño más práctico para el transporte, *siempre y cuando la flecha de orientación marcada se conserve y sea suficiente material orientado para cortar o perforar un espécimen en el laboratorio.*

El protocolo de muestreo paleomagnético está resumido en la **Figura 9**. Se recomienda imprimirlo y llevarlo a campo para tener una versión breve y visual del protocolo para referenciarse durante el muestreo. Un video sobre los pasos de muestreo está disponible en el **Material Suplementario 2**.

6. PRÓXIMOS PASOS

El proceso se debe repetir para cuantos sitios sean necesarios dependiendo de los objetivos del estudio. Una investigación detallada de una sola erupción o depósito puede involucrar la recolección de muestras en varios sitios en diferentes ubicaciones, así como en diferentes niveles dentro del depósito, o pulsos de una erupción, como se mencionó anteriormente. En cambio, un estudio de múltiples erupciones a través de tiempo puede involucrar solo un sitio para cada una de las erupciones estudiadas depende de la existencia, accesibilidad y seguridad de los sitios de muestreo (p. ej., en una área con intensa actividad volcánica).

Las muestras se deben enviar a un laboratorio paleomagnético, donde los clastos se pueden cortar o perforar para realizar los especímenes paleomagnéticos. Estos se pueden medir con un magnetómetro para determinar sus direcciones paleomagnéticas y posiblemente con otros equipos magnéticos para determinar otras características magnéticas importantes (p.ej., temperatura de Curie, propiedades de histéresis). Esto brinda los datos necesarios para el análisis que determina los tipos de depósitos y temperaturas de emplazamiento.

7. OBSERVACIONES FINALES

La aplicación del protocolo de muestreo y los métodos paleomagnéticos de cuales se describieron a lo largo de esta guía pueden proporcionar información sobre las temperaturas de emplazamiento de las CDPs y, además, también son de utilidad para el reconocimiento de diferentes tipos de depósitos que no se puede distinguir claramente en campo (depósitos primarios versus depósitos secundarios). Estos métodos son de mucha utilidad para conocer con mayor detalle las características físicas que gobiernan los procesos de emplazamiento de las CDP en volcanes con actividad frecuente. Conjuntamente, pueden brindar información para complementar otros estudios y observaciones de la actividad eruptiva. Aunque los investigadores y el personal de los observatorios volcanológicos no siempre tienen las mismas prioridades y responsabilidades, la utilización de estos métodos para el estudio de erupciones explosivas frecuentes puede brindar datos útiles tanto para la investigación científica fundamental como para aplicaciones prácticas. La experiencia y el conocimiento que tienen los observatorios en su volcán(es) y en los depósitos recientes

producidos por el mismo en combinación con la experiencia paleomagnética, así como los recursos y equipamiento de laboratorio de los institutos de investigación y las universidades, proporcionan la base para realizar estudios colaborativos fundamentales e innovadores. Estos estudios de las propiedades dinámicas a corto y largo plazo y de las características peligrosas de las PDC y los lahares son importantes para una mejor comprensión de los procesos volcánicos y para el trabajo que se realiza en los observatorios volcanológicos con relación al monitoreo, planeación, y mitigación de erupciones explosivas.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

GAL escribió el primer borrador en inglés y español. RMLB editó la versión en español del manuscrito. Ambos autores contribuyeron a la producción de figuras, la recolección de fotos de campo y videos, así como la edición y finalización de la guía.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal de INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología) y del Observatorio Volcanológico de Volcán de Fuego en Guatemala por las discusiones en campo que inspiraron la elaboración de la presente guía. Reconocemos revisiones de Takeshi Hasegawa y Pedro Doll y edición por Jamie Farquharson. Agradecemos especialmente al Dr. Hasegawa por una conversación y comentarios constructivos que nos ayudó en mejorar la guía. Agradecemos a Pedro Doll por su edición de la versión español del manuscrito. También agradecemos a Bernardo García Amador por consejos sobre terminología paleomagnética en español.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No se crearon ni se recopilaron nuevos datos para esta guía.

DERECHOS DE AUTOR

© Los Autores 2026. Este artículo se distribuye bajo los términos de la **Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional**, que permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando se dé el crédito apropiado al/los autor(es) original(es) y la fuente, proporcionando un enlace a la Creative Commons License, e indicando si se realizaron cambios.

REFERENCIAS

- Alva Valdivia, L. M., J. R. Torres-Hernández, J. A. Gonzalez Rangel, C. I. Caballero Miranda, J. G. Rosas Elguera y N. Villalobos Romero (2012). «Paleomagnetism in the determination of the emplacement temperature of Panalillo Ignimbrite, Juchin, San Luis Potosi, Mexico». *Revista mexicana de ciencias geológicas* 29(3), páginas 619-638.
- Aramaki, S. y S. Akimoto (1957). «Temperature estimation of pyroclastic deposits by natural remanent magnetism». *American Journal of Science* 255(9), páginas 619-627. DOI: [10.2475/ajs.255.9.619](https://doi.org/10.2475/ajs.255.9.619).

- Bardot, L. y E. McClelland (2000). «The reliability of emplacement temperature estimates using palaeomagnetic methods: a case study from Santorini, Greece». *Geophysical Journal International* 143(1), páginas 39–51. DOI: [10.1046/j.1365-246x.2000.00186.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2000.00186.x).
- Bowles, J. A., D. M. Gerzich y M. J. Jackson (2018). «Assessing New and Old Methods in Paleomagnetic Paleothermometry: A Test Case at Mt. St. Helens, USA». *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 19(6), páginas 1714–1730. DOI: [10.1029/2018gc007435](https://doi.org/10.1029/2018gc007435).
- Cañón-Tapia, E. (1993). «Applications to volcanology of palaeomagnetic and rock-magnetic techniques». Tesis doctoral. University of Hawai'i at Manoa.
- (2007). «Paleomagnetic Field Collection Methods». *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Editado por D. Gubbins y E. Herrero-Bervera. Springer Netherlands, páginas 765–766. ISBN: 9781402039928. DOI: [10.1007/978-1-4020-4423-6_254](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4423-6_254).
- Cioni, R., L. Gurioli, R. Lanza y E. Zanella (2004). «Temperatures of the A.D. 79 pyroclastic density current deposits (Vesuvius, Italy)». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 109(B2). DOI: [10.1029/2002jb002251](https://doi.org/10.1029/2002jb002251).
- Cole, P. D., A. Neri y P. J. Baxter (2015). «Hazards from Pyroclastic Density Currents». *The Encyclopedia of Volcanoes*. Elsevier, páginas 943–956. ISBN: 9780123859389. DOI: [10.1016/b978-0-12-385938-9.00054-7](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385938-9.00054-7).
- Graham, J. W. (1949). «The stability and significance of magnetism in sedimentary rocks». *Journal of Geophysical Research* 54(2), páginas 131–167. DOI: [10.1029/jz054i002p00131](https://doi.org/10.1029/jz054i002p00131).
- Hasegawa, T., B. Kikuchi, S. Shibata, Y. Yamamoto, T. Imura, M. Ban, K. Tsunematsu, C. Kusu, M. Okada y T. Ohba (2023). «Paleomagnetism and paleomagnetic dating to large volcanic bombs: an example from the historical eruption of Azuma–Jododaira volcano, NE Japan». *Earth, Planets and Space* 75(1). DOI: [10.1186/s40623-023-01931-3](https://doi.org/10.1186/s40623-023-01931-3).
- Hasegawa, T., N. Mochizuki, H. Shibuya, A. Nishihara, C. Kusu, S. Shibata, M. Okada, K. Nishiki e Y. Sato (2024). «Paleomagnetic study of the 30 ka Aira caldera-forming eruption and 60–45 ka Iwato pyroclastic flow deposits, southern Kyushu, Japan». *Earth, Planets and Space* 76(1). DOI: [10.1186/s40623-024-02089-2](https://doi.org/10.1186/s40623-024-02089-2).
- Hoblitt, R. P. y K. S. Kellogg (1979). «Emplacement temperatures of unsorted and unstratified deposits of volcanic rock debris as determined by paleomagnetic techniques». *Geological Society of America Bulletin* 90(7), páginas 633–642. DOI: [10.1130/0016-7606\(1979\)90<633:etouau>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1979)90<633:etouau>2.0.co;2).
- Juárez-Arriaga, E., K. Sieron y H. Böhnelt (2025). «Age of Holocene lava flows of Pico de Orizaba from paleomagnetic data». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 468, página 108434. DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2025.108434](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2025.108434).
- Kent, D. V., D. Ninkovich, T. Pescatore y S. R. J. Sparks (1981). «Palaeomagnetic determination of emplacement temperature of Vesuvius AD 79 pyroclastic deposits». *Nature* 290(5805), páginas 393–396. DOI: [10.1038/290393a0](https://doi.org/10.1038/290393a0).
- Lerner, G. A., S. J. Cronin, G. M. Turner y E. J. Piispa (2019a). «Recognizing long-runout pyroclastic flow deposits using paleomagnetism of ash». *GSA Bulletin* 131(11–12), páginas 1783–1793. DOI: [10.1130/b35029.1](https://doi.org/10.1130/b35029.1).
- Lerner, G. A., S. J. Cronin, G. M. Turner y M. C. Rowe (2019b). «Paleomagnetic determination of the age and properties of the 1780–1800 AD dome effusion/collapse episode of Mt. Taranaki, New Zealand». *Bulletin of Volcanology* 81(3). DOI: [10.1007/s00445-019-1275-z](https://doi.org/10.1007/s00445-019-1275-z).
- Lerner, G. A., E. J. Piispa, J. A. Bowles y M. H. Ort (2022). «Paleomagnetism and rock magnetism as tools for volcanology». *Bulletin of Volcanology* 84(3). DOI: [10.1007/s00445-022-01529-9](https://doi.org/10.1007/s00445-022-01529-9).
- McClelland, E., C. J. N. Wilson y L. Bardot (2004). «Palaeotemperature determinations for the 1.8-ka Taupo ignimbrite, New Zealand, and implications for the emplacement history of a high-velocity pyroclastic flow». *Bulletin of Volcanology* 66(6), páginas 492–513. DOI: [10.1007/s00445-003-0335-5](https://doi.org/10.1007/s00445-003-0335-5).
- Ort, M. H., M. Porreca y J. W. Geissman (2015). «The use of palaeomagnetism and rock magnetism to understand volcanic processes: introduction». *Geological Society, London, Special Publications* 396(1), páginas 1–11. DOI: [10.1144/sp396.17](https://doi.org/10.1144/sp396.17).
- Ort, M. H., M. Rosi y C. D. Anderson (1999). «Correlation of deposits and vent locations of the proximal Campanian Ignimbrite deposits, Campi Flegrei, Italy, based on natural remanent magnetization and anisotropy of magnetic susceptibility characteristics». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 91(2–4), páginas 167–178. DOI: [10.1016/s0377-0273\(99\)00034-7](https://doi.org/10.1016/s0377-0273(99)00034-7).
- Ort, M. H., G. Orsi, L. Pappalardo y R. V. Fisher (2003). «Anisotropy of magnetic susceptibility studies of depositional processes in the Campanian Ignimbrite, Italy». *Bulletin of Volcanology* 65(1), páginas 55–72. DOI: [10.1007/s00445-002-0241-2](https://doi.org/10.1007/s00445-002-0241-2).
- Paterson, G. A., A. P. Roberts, C. Mac Niocaill, A. R. Muxworthy, L. Gurioli, J. G. Viramonté, C. Navarro y S. Weider (2010). «Paleomagnetic determination of emplacement temperatures of pyroclastic deposits: an under-utilized tool». *Bulletin of Volcanology* 72(3), páginas 309–330. DOI: [10.1007/s00445-009-0324-4](https://doi.org/10.1007/s00445-009-0324-4).
- Pensa, A., L. Capra, G. Giordano y S. Corrado (2018). «Emplacement temperature estimation of the 2015 dome collapse of Volcán de Colima as key proxy for flow dynamics of confined and unconfined pyroclastic density currents». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 357, páginas 321–338. DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2018.05.010](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.05.010).
- Pierson, T. C., L. Siebert y K. M. Scott (2025). «Deposit Identification and Interpretation». *Deposits of Volcanic Wet Flows*. Springer Nature Switzerland, páginas 41–92. ISBN: 9783031665745. DOI: [10.1007/978-3-031-66574-5_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-66574-5_3).
- Speranza, F., S. Branca, M. Coltelli, F. D'Ajello Caracciolo y L. Vigliotti (2006). «How accurate is “paleomagnetic dating”? New evidence from historical lavas from Mount Etna». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 111(B12). DOI: [10.1029/2006jb004496](https://doi.org/10.1029/2006jb004496).
- Sulpizio, R., E. Zanella y J. L. Macías (2008). «Deposition temperature of some PDC deposits from the 1982 eruption of El Chichón volcano (Chiapas, Mexico) inferred from

- rock-magnetic data». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 175(4), páginas 494-500. DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2008.02.024](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.02.024).
- Tanaka, H., H. Hoshizumi, Y. Iwasaki y H. Shibuya (2004). «Applications of paleomagnetism in the volcanic field: A case study of the Unzen Volcano, Japan». *Earth, Planets and Space* 56(7), páginas 635-647. DOI: [10.1186/bf03352526](https://doi.org/10.1186/bf03352526).
- Tauxe, L., S. K. Banerjee, R. F. Butler y R. van der Voo (2018). *Essentials of paleomagnetism: Fifth web edition*. La Jolla, USA: Scripps Institution of Oceanography. URL: <https://ltauxe.github.io/Essentials-of-Paleomagnetism/WebBook3.html>.
- Uehara, D., R. Cas, C. Folkes, S. Takarada, H. Oda y M. Porreca (2015). «Using thermal remanent magnetisation (TRM) to distinguish block and ash flow and debris flow deposits, and to estimate their emplacement temperature: 1991–1995 lava dome eruption at Mt. Unzen Volcano, Japan». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 303, páginas 92-111. DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2015.07.019](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.07.019).